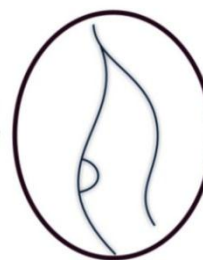


MOURA, Cristopher A. Martins de; JÚNIOR, Alex Neves; SILVA, Rogério B. da; REZENDE, Greyce B. de Mello (2018)



INTERFACE
ISSN 2448-2064



56

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE CLÍNQUERES PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE TELHA CERÂMICA VERMELHA DE FONTES DISTINTAS EM SUBSTITUIÇÃO À ARGILA NATURAL COMO PROPOSTA DE COPROCESSAMENTO

CHEMICAL COMPOSITION OF CLÍNQUERES PRODUCED WITH RED CERAMIC TILE WASTE OF DIFFERENT SOURCES IN SUBSTITUTION TO THE NATURAL CLAY AS PROPOSAL OF COPROCESSING

Cristopher Antonio Martins de Moura
cristopherantonio@live.com

Alex Neves Junior
alexnevesjr@hotmail.com

Rogério Barbosa da Silva
rogerio.ufmt@outlook.com

Greyce Bernardes de Mello Rezende
greycebernardes@yahoo.com.br

Resumo

O crescimento da população mundial e os padrões de consumo atuais demonstram a necessidade do desenvolvimento de soluções ambientalmente seguras e ao mesmo tempo eficazes para destinação dos resíduos que são gerados nas atividades humanas. O coprocessamento feito na indústria cimenteira, em suas diferentes modalidades, tem se mostrado positivo como uma alternativa de gerenciamento de grande variedade de resíduos. Dentro desse conceito, o presente trabalho teve como objetivo analisar a composição em óxidos de clínqueres produzidos pelo coprocessamento de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) em substituição a argila utilizada na fabricação do cimento Portland. Tal procedimento apresenta-se como uma alternativa para coprocessamento de resíduos da construção civil, visando a redução do impacto ambiental através da substituição total ou parcial de uma matéria-prima extraída da natureza (a argila) por material obtido pelo beneficiamento de resíduos de cerâmica vermelha obtidos em canteiros de obras. Para essa pesquisa foi utilizado RCV de três fontes distintas para produzir três clínqueres diferentes que foram caracterizados por fluorescência de raios-X. Os resultados mostraram quantidades predominantes dos mesmos óxidos que compõe os clínqueres utilizados para fabricação de cimentos industrializados, como a sílica, a alumina, o óxido de ferro e o óxido de cálcio. Entretanto, pela análise do módulo de sílica, módulo de alumina e fator de saturação de cal, como parâmetros controle de qualidade, conclui-se que os clínqueres produzidos não situaram-se nas faixas ideais de valores esperados para os módulos calculados, apresentando, em alguns casos, valores próximos aos limites, indicando portanto, necessidade de alteração na dosagem experimental. Todavia, a obtenção clínquer produzido com a partir da substituição da argila convencional pelo resíduo indica possibilidade de desenvolvimento de uma proposta de coprocessamento que vise incorporação de resíduos de cerâmica novamente à cadeia.

Palavras-Chave: Clínquer. Coprocessamento de resíduos. Resíduo de cerâmica vermelha.

Abstract

The increase of the world population and the current consumption pattern show the necessity of the development of secure environmental solutions and the same time effective for the waste destinations, which are begotten by the human activities. The coprocessing done by the cement industry, in their different models, have shown being positive as an alternative of management of a huge variety of residues. Inside this concept, the present work had the aim to analyze the oxide composition of the clinker produced by the coprocessing of red ceramic wastes (RCW) in replacement of the clay used in the manufacturing of Portland cement. Such procedure present as an alternative for coprocessing of civil construction waste, aiming the reduction of environmental impact by total or partial replacement of the raw material drew from the nature (the clay) by the material obtained from the beneficiation of red ceramic waste obtained from civil construction sites. For that research was used RCW from three different sources to yield three different clinkers that were characterized by X-Ray fluorescence. The results show the main amount of the same oxides, which make up the clinkers used for cement manufacturing, such as silica, alumina, iron oxide and calcium oxide. However, by the analysis of the silica module, alumina module and the lime saturation factor, as parameters of quality control, it was concluded that the produced clinkers did not present values in the range of the optimal values expected to be, presenting in some cases close values regarding the respective modules limit, indicating the necessity to change the experimental dosage. Nevertheless, the achievement of clinkers produced from the replacement of conventional clay for red ceramic waste, indicates the possibility of a coprocessing development bid, which can add up such waste in the production chain.

Keywords: Clinker. Coprocessing of residue. Red ceramic residue.

Introdução

Dados preliminares de agosto de 2018 fornecidos pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2018a), mostraram que só no período de janeiro a setembro de 2018, no Brasil, as vendas de cimento no mercado interno acumularam 39,5 milhões de toneladas. A intensiva utilização de cimento Portland está relacionada às diversas possibilidades de emprego do material, principalmente na forma de concreto simples, concreto armado e argamassas.

Rossignolo (2009) atribui a intensiva utilização do concreto simples, em parte, à versátil aplicação do material e à sua adaptabilidade. No que se refere à aplicação do concreto armado, Carvalho e Figueiredo Filho (2016) evidenciam vantagens como a boa resistência à maioria das solicitações e a liberdade ao projetista por sua trabalhabilidade e adaptabilidade a várias formas. Além disso, destaca-se que as técnicas executivas do referido material são razoavelmente dominadas à nível nacional, o que contribui para vasta utilização.

Vinculado a esse acentuado emprego do cimento Portland estão os impactos e as alterações adversas que a sua produção acarreta. De acordo com a *Internacional Energy Agency* através da publicação *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (2018), a indústria do cimento contribui atualmente cerca de 7% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) a nível global e o terceiro maior consumidor industrial de energia.

Outrossim, depara-se ainda com a intensiva geração dos resíduos de construção e demolição (RCD) ou resíduos da construção civil (RCC) que representam outra parcela de

impacto ambiental associado à essa indústria, não associada com desenvolvimento de produtos, mas com a aplicação destes em obras civis.

Cumprе salientar que é nítido que o emprego de padrões de produção e consumo sustentáveis bem como o correto gerenciamento de resíduos sólidos podem mitigar significativamente os impactos ao meio ambiente e à saúde, já que aqueles são gerados em quantidades imensas devido a fatores diversos associados como intensa urbanização e expansão do consumo (JACOBI; BESEN, 2011).

Trabalhos sobre a temática da gestão de resíduos sólidos e a sua reinserção na cadeia produtiva demonstram diversas propostas que buscam maneiras de transformar o descarte em matéria-prima ou combustível aplicado a algum processo industrial, sendo um exemplo positivo e representativo a introdução dos resíduos da indústria siderúrgica na produção de cimento. Além disso, destaca-se trabalhos relacionado especificamente ao RCV (Resíduo de Cerâmica Vermelha), que apontam sua aplicabilidade em diversas situações: Brehm *et al.* (2013) indicam resultados favoráveis na estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha; Garcia *et al.* (2015) mostraram a adequabilidade do RCV para utilização como aditivo pozolânico para o cimento Portland e, mais recentemente, Cabral Júnior e Azevedo (2017) demonstraram a exequibilidade técnica-econômica do aproveitamento do RCV na composição de massas.

De acordo com o SNIC (2018b), devido às elevadas temperaturas atingidas no interior dos fornos na fabricação de cimento, esses representam uma alternativa para destruição de resíduos e passivos ambientais. Essa atividade, conhecida como coprocessamento de resíduos, consegue destruir de forma ambientalmente segura e adequada uma variedade de resíduos industriais como, por exemplo, pneumáticos usados, resíduos de madeira e serragem, lodo de estações de tratamento de efluentes, dentre outros, aplicando estes materiais como substitutos de combustíveis ou matérias-primas permitindo a destinação adequada e, ainda que parcialmente, reduzir o consumo de combustíveis tradicionais não renováveis.

Contudo, a utilização de resíduos de processos industriais como matéria-prima ou combustível para produção de cimento requer que sejam ponderados outros fatores, que vão além do viés ambiental da questão. Siqueira (2005) explica que há grandes dificuldades para identificação de resíduos que tenham similaridade com os combustíveis ou com as matérias-primas empregadas na produção do cimento e que obtenham resultados ambientais satisfatórios e viabilidade técnica para a prática, destacando também o fator relacionado à qualidade da matéria-prima empregada, considerando-a decisiva para que a natureza

hidráulica ou outras características do cimento não sofram prejuízos, devendo portanto, a composição das matérias-primas ser considerada.

De modo a avaliar uma possível alternativa sustentável, o presente trabalho tem como objetivo analisar a composição em óxidos de clínqueres produzidos pelo coprocessamento de resíduos de cerâmica vermelha de fontes distintas em substituição a argila comumente utilizada na fabricação do cimento Portland. Tal procedimento apresenta-se como uma contribuição para coprocessamento dos resíduos da construção civil que visa a redução do impacto ambiental através da substituição total ou parcial de uma matéria-prima extraída da natureza (a argila) por uma matéria-prima obtida do beneficiamento de resíduos sólidos de cerâmica vermelha obtidos em obras e depósitos.

Aspectos sobre Coprocessamento de Resíduos

Atualmente a sociedade enfrenta desafios no que tange à geração excessiva e disposição final ambientalmente correta para os resíduos sólidos. Haja vista o aumento na produção de resíduos, bem como a falta de gestão e gerenciamento adequados e a insuficiência de áreas para disposição final (JACOBI; BESEN, 2011).

O crescimento populacional e o constante desenvolvimento das indústrias evidenciam a necessidade do estudo de soluções para destinação dos resíduos gerados, sendo o coprocessamento oferecido pela indústria de cimento uma forma de gestão de grande parte desses resíduos (ABCP, 2017a).

De acordo com Souza (2017), a prática do coprocessamento tem se ampliado no Brasil, visto que esta técnica alimenta benefícios no âmbito econômico e ambiental. Nesse contexto, a Figura 1 demonstra a evolução do coprocessamento em fornos de cimento.

Figura 1 – Evolução dos resíduos coprocessados em fornos de cimento (2000-2016) em toneladas



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2017a)

Destaca-se que, segundo ABCP (2017a), no período de 2000 a 2016 houve aumento na destruição de resíduos em fornos de cimento da ordem de 500%, com uma grande evolução a partir do ano de 2006, atingindo em 2016 o patamar de 940 mil toneladas de resíduos que sofreram coprocessamento em fornos de cimento.

Além disso, sob a ótica de Ramos (2015) o processo de coprocessamento na indústria cimenteira possui também a vantagem de que a unidade fabril pode ser empregada no ato de destruir resíduos perigosos com elevado grau de eficiência sem que sejam necessárias alterações significativas no processo sendo, portanto, um método de menor custo do que outras alternativas de destruição de resíduos.

De acordo com a composição o resíduo pode ser destinado à diferentes finalidades. Nas fábricas de cimento suíças, por exemplo, o resíduo pode ser utilizado como material de substituição da farinha, como combustível, materiais auxiliares de operação bem como material de adição (BUWAL, 1998 *apud* SIQUEIRA, 2005).

Estudos realizado por Silva (2015) demonstraram que a composição em óxido de resíduos de telha cerâmica vermelha apresentou predominância de sílica, alumina e óxido de ferro, verificando-se que os resíduos apresentam os compostos necessário à formação dos principais componentes do cimento Portland. Além disso, Puertas *et al.* (2008) destacaram que os resultados alcançados em seu trabalho evidenciaram viabilidade técnica no uso de resíduos cerâmicos na fabricação de clínquer de cimento Portland, como uma matéria-prima alternativa.

Dessa forma, o estudo do coprocessamento de resíduos de telha cerâmica vermelha de fontes distintas (obras e depósitos) visa contribuir com o estudo de práticas sustentáveis no âmbito da construção civil, buscando fornecer destinação adequada aos resíduos de cerâmica, tão abundantes nas obras correntes.

Aspectos sobre Cimento Portland e sua composição

Sob a ótica da Associação Brasileira de Cimento Portland–ABCP (2017b), o cimento é um pó fino que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que endurece sob ação de água e que na forma de concreto, transforma-se em pedra artificial.

A produção do cimento Portland inicia com a mistura íntima de materiais calcários, argilosos ou outros materiais ricos em silício, alumina e óxido de ferro, sendo estes os principais compostos para a produção de cimento Portland. O processo de produção consiste na moagem das matérias-primas formando uma mistura em proporções definidas, à qual é encaminhada para queima em fornos rotativos que podem chegar à 230 metros de

comprimento e a temperaturas de aproximadamente 1400°C ocorrendo sinterização e fusão parcial da mistura formando o clínquer. Este recebe adição de gipsita e é moído, resultando no cimento Portland comercial, que pode sofrer outras adições (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Na etapa de queima, as matérias-primas são submetidas à uma série de reações químicas para formação dos silicatos e aluminatos, os quais compõe os principais constituintes do clínquer, que são o silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (GOBBO, 2009).

A ABCP (2017c) descreve que no mercado brasileiro há disponibilidade de oito opções de cimento Portland havendo subdivisões em algumas opções totalizando onze tipos de cimento. São eles:

- 1) Cimento Portland Comum (CP I)
 - a. CP I - Cimento Portland Comum
 - b. CP I - S - Cimento Portland Comum com Adição
- 2) Cimento Portland Composto (CP II)
 - a. CP II - E - Cimento Portland Composto com Escória
 - b. CP II - Z - Cimento Portland Composto com Pozolana
 - c. CP II - F - Cimento Portland Composto com Filer
- 3) Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)
- 4) Cimento Portland Pozolânico (CP IV)
- 5) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)
- 6) Cimento Portland Resistente à Sulfatos (RS)
- 7) Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
- 8) Cimento Portland Branco (CPB)

Os onze cimentos diferenciam-se em termos de porcentagem de clínquer e sulfato de cálcio, material carbonático e de adições acrescentadas no processo de moagem. Além disso, podem diferir também quanto a algumas características específicas como a alta resistência inicial e a cor branca (ABCP, 2017c).

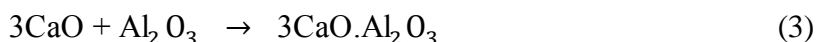
A composição química do silicato tricálcico é $3CaO.SiO_2$ e este contribui principalmente para a resistência nas primeiras quatro semanas do processo de hidratação (NEVILLE, 2016). Na clinquerização, esse composto se forma no intervalo de temperaturas entre 1350°C e 1450°C aproximadamente de acordo com a reação apresentada na equação (1) (PAULA, 2009).



Já o silicato dicálcico, outro composto de elevada importância na hidratação do cimento Portland, apresenta composição química em óxidos $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ e contribui principalmente para a resistência a partir da quarta semana do processo de hidratação (NEVILLE, 2016). A formação desse composto, na clínquerização, ocorre no intervalo de temperaturas entre 1250°C e 1300°C aproximadamente de acordo com a reação apresentada na equação (2) (PAULA, 2009).



Ainda elencando os principais compostos, destaca-se o aluminato tricálcico que é o principal composto de aluminato em clínquer de cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2006). O aluminato tricálcico apresenta composição química em óxidos $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$. Apresenta-se em quantidade relativamente pequena nos cimentos, mas tem importante influência no comportamento do material haja vista que a reação entre o aluminato tricálcico e água causa enrijecimento instantâneo. Todavia, este composto contribui muito pouco para a resistência do cimento, exceto entre um e três dias (NEVILLE, 2016). Na clínquerização, a formação desse composto ocorre no intervalo de temperaturas entre 1200°C e 1300°C aproximadamente de acordo com a reação apresentada na equação (3) (PAULA, 2009).



O ferroaluminato tetracálcico apresenta composição química em óxidos $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$. Este composto tem contribuição insignificante na resistência do cimento (NEVILLE, 2016). A formação desse composto ocorre na clínquerização no intervalo de temperaturas entre 1200°C e 1300°C aproximadamente de acordo com a reação apresentada na equação (4) (PAULA, 2009).



De modo a garantir a qualidade dos clínqueres, deve-se manter alguns parâmetros dentro de certos intervalos de valores. Os parâmetros são o módulo de sílica (MS), o módulo de alumina (MA) e o fator de saturação de cal (FSC) (RAMOS, 2015). As equações (5), (6) e (7) apresentam a forma de calcular os módulos citados.

$$\text{MS} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (5)$$

$$\text{MA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (6)$$

$$FSC = \frac{100 \times \text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,1\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (7)$$

O módulo de sílica interfere na queima da farinha, na formação da colagem no refratário do forno, na granulometria do clínquer e na fase líquida de modo que um módulo de sílica baixo aumenta a fase líquida e a formação de colagens beneficiando a queima, tendo características otimizadas quando esse valor se encontra entre 2,3 e 2,7 (CARPIO, 2005; RAMOS, 2015).

Com relação ao módulo de alumina, Carpio (2005) explica que um valor baixo deste, torna a fase líquida menos viscosa, facilita a cinética das reações e melhora a nodulização do clínquer, tendo valores ótimos entre 1,3 e 2,7.

No estudo do fator de saturação de cal, Ramos (2015) destaca que quando seu valor é alto, é dificultada a queima da farinha crua, o que exige maior quantidade de combustível enquanto que valores muito baixos permitem queima com facilidade, mas obtém-se clínquer demasiadamente queimado, o que é indesejável. ABCP (1984) *apud* Carpio (2015) indicam que o valor ótimo se encontra entre 90% e 100%.

Metodologia

Visto que a presente pesquisa objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática direcionados para resolução de problemas específicos, pode-se classificá-la, quanto a sua natureza, como aplicada (PRODANOV; FREITAS, 2013).

A pesquisa iniciou-se por meio de uma atividade de campo, na qual foram identificadas localidades com intensiva geração de resíduos sólidos, constatando-se que tanto em obras novas quanto em obras de reforma e depósitos de materiais havia expressiva quantidade de resíduo gerado. Nas Figuras 2 e 3 estão apresentadas algumas das localidades visitadas.

Figura 2 – Entulho de obras residenciais.



Fonte: Arquivo do autor (2017).

Figura 3 – Entulho de obras comerciais.



Fonte: Arquivo do autor (2017).

Foi observado proporcionalmente a outros resíduos, a grande quantidade de resíduos de cerâmica vermelha provavelmente proveniente do manuseio, armazenamento ou aplicação inadequados ou não racionalizados, aliado à fragilidade dos artefatos de cerâmica que é uma característica inerente aos mesmos.

Nessa mesma etapa, foram recolhidas três amostras de resíduos de telha cerâmica vermelha para utilização na proposta de coprocessamento. Os resíduos selecionados foram separados beneficiados por meio de maceração com almofariz e pistilo de Ágata sendo posteriormente separadas as granulometrias mais finas (parcela passante na peneira 0,075mm) utilizando-se vibrador mecânico de peneiras visando obter material pulverulento para produção do clínquer buscando melhora no desenvolvimento das reações no interior do forno.

Tosta, Souza e Silva (2007) elucidam, para produção do cimento Portland, as matérias-primas compõem-se de aproximadamente 80% de carbonato de cálcio (CaCO_3), 15% de dióxido de silício (SiO_2), 3% de óxido de alumínio (Al_2O_3), além de outros constituintes em quantidades menores. Dessa forma, para produção do clínquer fixou-se a proporção de 80% de calcário calcítico e 20% de resíduo de telha cerâmica vermelha, em substituição a argila utilizada no processo convencional de fabricação do cimento Portland. As matérias-primas foram misturadas para realização da queima em mufla por um período de três horas a temperatura de 1200 °C, como foi realizado por Silva (2015). O clínquer, produto da queima, foi macerado com almofariz e pistilo de Ágata, obtendo-se um pó fino como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Maceração de clínquer produzido com substituição de argila por RCV beneficiado



Fonte: Arquivo do autor (2017).

Na etapa subsequente, os clínqueres produzidos, denominados genericamente de clínquer 1, clínquer 2 e clínquer 3, foram encaminhados para caracterização por fluorescência de raios-X (FRX) de modo a se obter a composição em óxidos. As análises de FRX foram efetuadas no Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA), instalado na Faculdade de Geociências da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

Para início do procedimento de análise química por FRX, foram arranjadas pastilhas prensadas a partir do pó dos clínqueres pulverizados. Realizou-se análises quantitativas por meio de padrões internos, através da rotina Qual-Quant FP©. Para o procedimento, utilizou-se um feixe de 10 mm de diâmetro e tensões no tubo de 15 e 50 kV, respectivamente, para a detecção dos elementos do Sódio (Na) ao Escândio (Sc) e do Titânio (Ti) ao Urânio (U).

Obtidos os dados dos ensaios, estes foram analisados pelos parâmetros de módulo de sílica, módulo de alumina e fator de saturação de cal como parâmetros de indicativo de

qualidade dos clínqueres produzidos bem como a comparação das composições obtidas com a literatura especializada.

Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises de fluorescência de raios-X dos clínqueres produzidos com coprocessamento dos resíduos de telha cerâmica vermelha, substituindo a argila comumente utilizada no processo industrial.

Tabela 1 –Análise FRX dos clínqueres produzidos com resíduos de telha cerâmica vermelha

Clínquer	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	K ₂ O	SrO	Outros
1	73,382	13,631	6,273	2,662	2,254	1,526	0,236	0,036	-
2	72,300	11,048	7,239	3,901	4,002	-	0,864	0,035	0,612
3	72,327	11,175	6,905	4,944	3,840	-	0,221	0,037	0,552

Fonte: Construção dos autores (2018).

A análise de fluorescência de raios-X dos clínqueres anidros, permite observar que há quantidade apreciável dos principais óxidos que durante a clínquerização originam os compostos responsáveis pelas principais características do cimento Portland. São eles a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃) e o óxido de cálcio (CaO) que durante a clínquerização podem originar silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF).

Gobbo (2003), no estudo de 40 amostras de clínqueres provenientes de cinco fornos diferentes e com características distintas quanto às matérias-primas e processo de fabricação, demonstrou em análise da composição química das amostras que os clínqueres apresentaram proporções de CaO e SiO₂ nas faixas de 63,3-70,6% e 19,8-24,4%, respectivamente. Isso demonstra que todos os clínqueres sintetizados com resíduo de telha possuem proporção elevada de CaO e deficiência de SiO₂, com relação às amostras analisadas por Gobbo (2003).

Da mesma forma, a comparação com os resultados de análises realizadas por Puertas *et al.* (2008), que produziram clínqueres com resíduos cerâmicos, demonstra que os clínqueres obtidos na presente pesquisa têm proporção elevada de CaO e deficiência de SiO₂, já que os autores obtiveram proporções de CaO e SiO₂ nas faixas de 66,9-67,9% e 20,6-21,4%.

Nos clínqueres produzidos com resíduos de telha cerâmica vermelha desenvolvidos neste trabalho, foram observadas quantidades de MgO (óxido de magnésio) elevadas comparativamente aos resultados apontados por Gobbo (2003), que em suas análises encontrou proporções de 0,3% à 3,6%. O óxido de magnésio, em geral, está presente como impureza na maioria dos calcários. Se esse composto em sua forma cristalina (MgO)

denominado periclásio, que possui hidratação lenta e expansiva que sob certas condições pode resultar em efeitos deletérios (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

De modo a analisar a qualidade dos clínqueres, aplicou-se as equações (5), (6) e (7), e calculou-se os parâmetros de qualidade módulo de sílica (MS), o módulo de alumina (MA) e o fator de saturação de cal (FSC), que estão elencados na Tabela 2.

Tabela 2 –Análise dos clínqueres segundo padrões de qualidade pelo cálculo dos módulos

Clínquer	MS	MA	FSC
1	2,77	1,18	171,96
2	1,40	0,98	190,13
3	1,27	1,29	183,50

Fonte: Construção dos autores (2018).

Observa-se que o módulo de sílica do clínquer 1 está próximo do limite superior da zona ótima (2,7), destacando-se que os valores elevados de módulo de sílica provocam aumento da proporção de C_3S e C_2S (CARPIO, 2005).

Com relação ao módulo de alumina dos clínqueres 1 e 3 se situam próximos do limite inferior da zona ótima (1,3), indicado pelos referidos autores. Reitera-se que, segundo Carpio (2005), um módulo de alumina mais baixo atua tornando a fase líquida menos viscosa facilitando a cinética das reações e melhorando a granulação do clínquer.

No que tange aos resultados obtidos de fator de saturação de cal, os valores situam-se sobremaneira acima da zona ótima indicada, demonstrando possível excesso de cal na composição da farinha crua, que nos permite observar necessidade de alteração da dosagem de acordo com a composição do calcário calcítico utilizado.

Segundo Assunção e Pires (1999) *apud* Carpio (2005), o valor elevado FSC indica uma farinha difícil de ser queimada, necessidade de maior consumo de combustível, quantidade elevada de cal livre (já que este módulo relaciona-se com a quantidade máxima de cal que pode reagir com outros óxido que compõe a matéria-prima) além da baixa resistência. Destaca-se que elevada proporção de cal livre, pode ocasionar efeitos deletérios pela reação expansiva, como explicado por Gobbo (2009).

Dessa forma, com base nos parâmetros apresentados por Carpio (2005) e Ramos (2015), observa-se que nenhum dos três clínqueres produzidos situam-se nas faixas ótimas indicadas tanto para módulo de sílica (MS) quanto para módulo de alumina (MA) e fator de saturação de cal (FSC).

Outrossim, a comparação da composição dos clínques obtidos com as composições apresentadas em bibliografia especializada permite observar que há excesso de óxido de cálcio e óxido de magnésio, bem como deficiência em óxido de silício, indicando necessidade de estudo de dosagens experimentais e correções da composição da farinha crua, não excluindo a possibilidade do uso do resíduo de telha cerâmica vermelha beneficiado.

No que tange contexto ambiental, foi possível obter clínques que apresentavam os principais compostos do cimento Portland o que representa uma contribuição à sustentabilidade na construção civil por meio do estudo de alternativas de coprocessamento que visam a destinação adequada de resíduos.

Considerações finais

O estudo da composição por fluorescência de raios-X de clínques produzidos por coprocessamento de resíduo de telha cerâmica vermelha em substituição à argila permitiram concluir que os clínques obtidos apresentaram quantidades apreciáveis dos principais óxidos que compõe os clínques para produção cimentos Portland comerciais, são eles a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3) e o óxido de cálcio (CaO).

Todavia, dentre os parâmetros de qualidade módulo de sílica (MS), o módulo de alumina (MA) e o fator de saturação de cal (FSC), somente o clínquer 1 está próximo do limite superior da zona ótima para MS e com relação ao MA, os clínques 1 e 3 situam-se próximos do limite inferior da zona ótima. Para o FSC, todos os clínques apresentaram valores muito elevados com relação à zona ótima, o que em conjunto com a comparação com composição de clínques obtidos na literatura, indica necessidade de dosagens experimentais com correções para composição de um clínquer que atenda aos parâmetros de qualidade e evite excessos de cal livre que podem, por reação com a água, produzir hidróxido de cálcio e assim uma hidratação expansiva.

Ressalta-se, entretanto, que a obtenção clínquer produzido com aplicação de um tipo de resíduo da construção civil (RCC) se apresentou inicialmente como um procedimento válido que indica possibilidade de desenvolvimento de uma proposta de coprocessamento à ser aprimora que vise incorporação de resíduos de cerâmica novamente à cadeia produtiva na forma de matérias-primas sem gerar novos impactos ambientais.

Agradecimentos

Os resultados de composição em óxidos discutidos no presente trabalho baseiam-se na interpretação dos dados advindos das análises realizadas pela equipe do

Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA), à qual cordialmente agradecemos pela colaboração.

São oferecidos também agradecimentos a Faculdade de Geociências da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), ao Instituto de Física da UFMT e à equipe do projeto da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) # 01.04.0121.00 que também contribuíram com o projeto. De maneira especial, os autores agradecem a equipe Laboratório de Estudos de Materiais (LEMat-UFMT/CUA) por prontamente oferecerem o espaço e os equipamentos para evolução da presente pesquisa.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **PANORAMA DO COPROCESSAMENTO – BRASIL 2017**. 2017 Disponível em: <<http://bps.com.br/abcp/panorama/2018/files/assets/common/downloads/publication.pdf>>. Acesso em: 20/ Ago./2018.

_____. **Básico sobre cimento**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento/>>. Acesso em: 20/ Out./2018.

_____. **A VERSATILIDADE DO CIMENTO BRASILEIRO**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/>>. Acesso em: 20/ Out./2018.

BREHM, F.A. et al. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n.2, p. 15-27, abr./jun. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S167886212013000200003&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 15/Dez./2017.

CABRAL JÚNIOR, M.; AZEVEDO, P.B.M. Potencial técnico e econômico do aproveitamento de resíduos da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, [s.l.], v.22, n.3, p. 29-38, mai./jun. 2017. Disponível em: <http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v22n3/v22n3a04.pdf>>. Acesso em: 16/Dez./2017.

CARPIO, R.C. **OTIMIZAÇÃO NO CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA DO CIMENTO ENVOLVENDO CUSTOS, QUALIDADE E IMPACTO AMBIENTAL**. 2005. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005

CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO, J.R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais e concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2016. 415 p.

GARCIA, E. et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v.61, p. 251-258, abr./mai./jun. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marsis_Junior/publication/282949901_Evaluation_of_the_pozzolanic_activity_of_heavy_clay_ceramic_waste_from_main_ceramic_clusters_of_S_Paulo_State_Brazil/links/562f5b6508aea5dba8d349a0.pdf>. Acesso em: 15/Dez./2017.

GOBBO, L.A. **OS COMPOSTOS DO CLÍNQUER PORTLAND: SUA CARACTERIZAÇÃO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E QUANTIFICAÇÃO POR REFINAMENTO DE RIETVELD**. 2003. 157 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2003.

GOBBO, L.A. **APLICAÇÃO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E MÉTODO DE REITVELD NO ESTUDO DE CIMENTO PORTLAND**. 2009. 251 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

JACOBI, P.R.; BESEN, G.R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **ESTUDOS AVANÇADOS**, São Paulo, v.25, n.71, p. 135-158, jan./abr. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142011000100010>. Acesso em: 20/ Set./2018.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 659 p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

PAULA, L.G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. 2009. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa De Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2009

PRODANOV, C.C.; FREITAS, E.C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 276 p.

PUERTAS, F.; GARCÍA-DÍAZ, I.; BARBA, A.; GAZULLA, M.F.; PALACIOS, M.; GÓMEZ, M.P.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, Issue 9, p. 798-805, 2008.

RAMOS, M.D. **Estudo da Formação e Emissão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento**. 2015. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2015.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto Leve Estrutural**: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1. ed. São Paulo: Pini, 2009. 144 p.

SILVA, R.B. **Síntese e caracterização de um aglomerante hidráulico a partir de resíduo de telha cerâmica vermelha**. 2015. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Mato Grosso, Barra do Garças, 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **INDÚSTRIA DO CIMENTO ACUMULA QUEDA DE 2,2% EM SETEMBRO**. Rio de Janeiro, 2018. 2 p. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/resultados-preliminares/1539695836.pdf>>. Acesso em: 25/Out./2017.

_____. Coprocessamento. 2018. Disponível em: <<http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>>. Acesso em: 20/Set./2018.

SIQUEIRA, L.C.G. **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS EMISSÕES DE METAIS GERADAS NO COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS EM FÁBRICAS DE CIMENTO**. 2005. 362 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

SOUZA, D.F.M. **AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DO COPROCESSAMENTO EM FORNOS DE CLÍNQUER**. 2017. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em gestão ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

TOSTA, L.I.; SOUZA, A.C.; SILVA, R.J. **Gestão da Energia na Produção de Cimento Portland com Uso de Mineralizadores e Combustíveis Alternativos**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27. 2007. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu. 2007.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT'S (WBCSD); CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE (CSI). **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 2018. 61 p. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>>. Acesso em: 20/Out./2018.